

## **Entwicklung und Validierung von Bremssystemen mit dem Rad-Schiene-Prüfstand „ATLAS“**

### ***Development and validation of braking systems with the ATLAS wheel-rail adhesion test rig***

Martin Heller, Jörg Koch, Christian Burger, Andreas Festel. München, Deutschland

#### Zusammenfassung:

Die Reproduzierbarkeit von Anhaltewegen bietet Potential für die weitere Verbesserung von Betriebsqualität sowie Nutzungsgrad der Schieneninfrastruktur, welches es durch Innovationen der Bremssteuerung zu heben gilt. Das Knorr-Bremse Konzept der „Reproducible Braking Distance“ (RBD) beruht auf der Integration des Rad-Schiene-Kraftschlusses und der Verzögerung in das geregelte Bremssystem. Auf dem Rad-Schiene-Prüfstand wurde in Machbarkeitstests nachgewiesen, dass auch bei extrem ungünstigen Umweltbedingungen mit diesem Konzept erhebliche Vorteile für die Anhaltewege erzielt werden können, ohne die installierte Abbremsung zu erhöhen. Der Prüfstand hat sich dabei als Werkzeug für Entwicklung und Validierung unter Bedingungen bewährt, die in Feldversuchen aufgrund von Aufwand und Risiken nur schwer realisierbar sind. Dabei werden Tests der Original-Bremse- und Laufwerksteile mit einer mathematischen Simulation von Schienenfahrzeugen und mit Datenbanken aus Feldtests kombiniert.

#### *Abstract (EN):*

*Generating reproducible braking distances has the potential to optimize the operational efficiency and utilization of the existing rail infrastructure. The aim is to leverage that potential through innovations in brake control. Knorr-Bremse's Reproducible Braking Distance (RBD) concept is based on factoring wheel-rail adhesion and deceleration into the brake control system. Feasibility tests on the wheel-rail adhesion test rig demonstrated that, even under extremely unfavorable environmental conditions, this concept enables substantial benefits to be achieved in terms of braking distances, with no need to increase the installed braking power. The test rig proved its worth here as a development and validation tool, operating under conditions which, in view of the cost, effort and risk involved, could only be implemented with difficulty in the real world. In the process, tests with original braking and running gear are combined with mathematical simulation of rail vehicles and with databases containing field test data.*

## **Integration des Rad-Schiene-Kontakts in die Bremssteuerung**

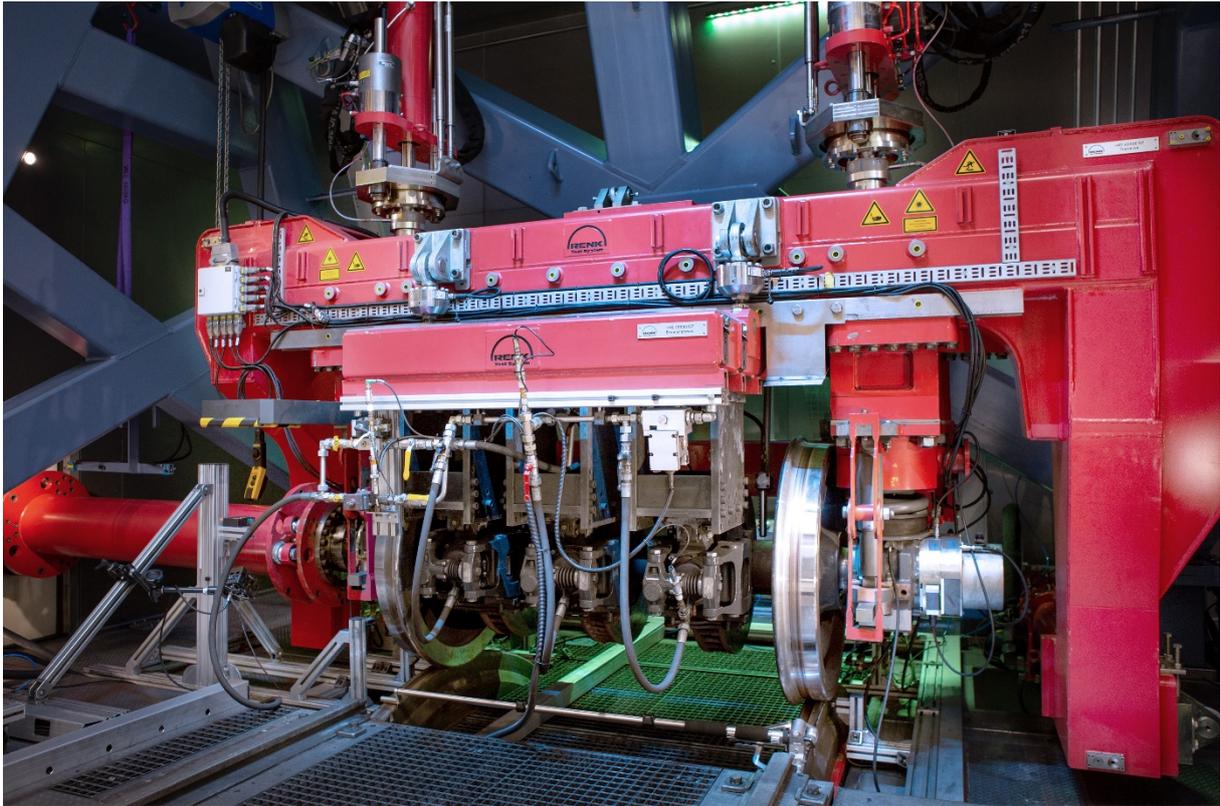
Ausgehend von einer Bremsanforderung und der Information über die Beladung des Fahrzeugs regelt eine konventionelle Steuerung der Druckluftbremse den Bremszylinderdruck am Drehgestell. Die Gleitschutzregelung hält dabei den Radschlupf in den vorgegebenen Grenzen. Die Brems- bzw. Anhaltewege werden jedoch auch von Toleranzen (der Druckregelkreise) und Störgrößen (Reibwerte, Umweltbedingungen wie Witterungseinflüsse und Schienenverschmutzungen) beeinflusst, die nicht in den Regelkreis der Bremssteuerung eingehen. Bei elektrodynamischer Bremsung bestehen prinzipiell die gleichen Problemstellungen.

Eine groß angelegte Simulationsstudie im Rahmen des europäischen Förderprogramms Shift2Rail mit dem Institut für Bahntechnik GmbH mit Sitz in Berlin beschrieb teilweise deutliche Potenziale einer verbesserten Infrastrukturausrüstung bei besser reproduzierbareren Anhaltewegen [1] (RBD). Bei trockenen Schienen ergaben sich folgende Spannen für verkürzte theoretische Zugfolgezeiten: U-Bahn: 9 bis 19%, S-Bahn: 9 bis 16%, Regionalverkehr mit Triebzügen: 1,5 bis 4% und Hochgeschwindigkeitsverkehr: bis zu 20%. Bei nassen Schienen ergaben sich: U-Bahn: 10 bis 13%, S-Bahn: 10 bis 12%, Regionaltriebverkehr mit Triebzügen: 4 bis 7%, Hochgeschwindigkeitsverkehr: bis zu 20%. Die Schwankungen der theoretischen Zugfolgezeiten resultieren aus den unterschiedlichen Betriebs- und Streckenparametern sowie dem Unterschied zwischen Fixed (Level 2) oder Moving Blocks (Level 3) des Zugbeeinflussungssystems ETCS.

Der Ansatz des integrierten Zusammenwirkens einer jeweils neuartigen Verzögerungsregelung (Deceleration Control), Gleitschutz (Wheel Slide Protection, WSP) sowie Kraftschlussbeeinflussung (Adhesion Management) zielt dabei nicht auf eine stärkere Bremsung der Fahrzeuge ab. Stattdessen will er über eine reduzierte Bremswegstreuung den „Emergency Brake Confidence Level“ erhöhen, um so den Abstand zwischen zwei aufeinanderfolgenden Zügen ohne Abstriche bei der Sicherheit verkürzen zu können.

Dem Adhesion Management kommt dabei eine besondere Bedeutung zu, da sich ein sehr schlechter (momentan verfügbarer) Rad-Schiene-Kraftschluss insbesondere durch Schienenbremsen durch keine andere Technologie ausreichend verbessern lässt. Für die Entwicklung von Bremssystemen geht damit jedoch eine Erschwernis einher: Geeignete Feldversuche sind durch die nötige Präparierung ganzer Streckenabschnitte aufwändig, riskant oder gar unmöglich.

Umso größer ist bei der Entwicklung und Validierung von „First-time-right“-Prototypen die Bedeutung von Prüfständen wie dem Knorr-Bremse Rad-Schiene-Prüfstand ATLAS (Advanced Test Laboratory for Adhesion based Systems).



*Bild 1: Ansicht des Rad-Schiene-Prüfstandes mit einem Radsatz mit drei Bremsscheiben*

Auf ihm sind Geschwindigkeiten bis zu 350 Stundenkilometern unter verschiedensten gut reproduzierbaren Umgebungsbedingungen mit Originalausrüstungen möglich.

Entsprechend einem V-förmigen Entwicklungsmodell beginnen die Prüfstandversuche mit Grundsatzversuchen, an die sich – noch losgelöst von konkreter Rechner-Hardware – Machbarkeitsstudien anschließen. Schließlich folgen Versuche mit Mustern von Produkten, um deren ersten Feldversuch bereits mit einem hohen Konfidenzniveau starten zu können.

### **Anwendungsbeispiele und Versuchsbedingungen**

Am Anfang von Versuchsserien steht die Gewinnung grundlegender Erkenntnisse, etwa hinsichtlich der Wirkung des Schlupfs und der Kraftschlussbeeinflussung bei unterschiedlichen Verschmutzungen von Rad und Schiene. Weitere Anwendungsbeispiele sind Machbarkeitstests und Potenzialermittlungen von Algorithmen für innovative Verfahren der Bremssteuerung, die vorläufige Validierung technischer Lösungen im Vorfeld der ersten Fahrzeugversuche sowie die Überprüfung von Einstellungen und Anhaltewegen für spezifische Projekte.

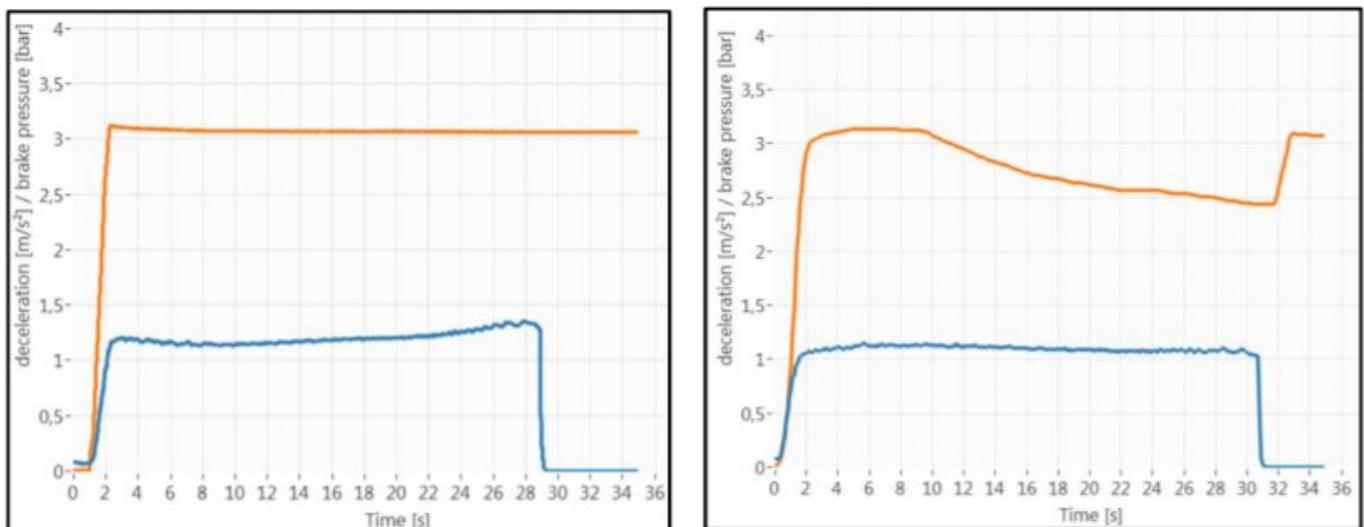
Da die Materialeigenschaften von Rad, Schiene und Zwischenschicht nicht skalierbar sind, ist die Originalgröße der Abmessungen und Kräfte für alle Versuchsarten wesentlich. Deshalb werden Original-Bremsgeräte verwendet. Die Bewegungsenergie des Fahrzeuges wird durch einen Antrieb mit 1,4 MW Leistung dargestellt. Die Ähnlichkeit der Ergebnisse zwischen Prüfstands- und Feldversuch



## Beispiele für Test-Ergebnisse der Verzögerungsregelung

Anhaltewege von Schienenfahrzeugen ergeben sich rechnerisch durch die zweifache Integration der Verzögerung. Je genauer die Verzögerung geregelt werden kann, desto besser ist der Anhalteweg determiniert. Auch eine zweite Zielgröße der Bremssteuerung, die limitierte Ausnutzung des Kraftschlusses, lässt sich unmittelbar durch die Verzögerungsregelung (DCC) erreichen. Soll der ausgenutzte Rad-Schiene-Kraftschluss zum Beispiel bei 15 Prozent liegen, beträgt die Verzögerung 15 Prozent der Erdbeschleunigung, folglich rund  $1,5 \text{ m/s}^2$ . Die Verzögerungsregelung gleicht nun Abweichungen in den momentanen Reibwerten der Bremsbeläge aus, in gewissen Grenzen auch solche, die aus Aquaplaning, Schnee und Eis resultieren.

Die Gegenüberstellung einer druckgeregelten und verzögerungsgeregelten Bremsung auf trockenem Gleis zeigt das Prinzip und den Mehrwert der geregelten Verzögerung: Bei der Versuchsfahrt mit konstantem Bremszylinderdruck variiert die Verzögerung mit dem während der Bremsung sich verändernden Belagreibwert. Kurz vor dem Halt ist der Reibwert am größten. Dies führt in der Praxis zu einem Halteruck, der mit Komforteinbußen und erhöhter Blockiergefahr verbunden und daher unerwünscht ist. In Triebzügen versucht die Bremssteuerung oft, den Ruck in der Betriebsbremse „wegzuregeln“. Ein erfahrener Triebfahrzeugführer kann ihn auch durch eine Lösestufe kompensieren.

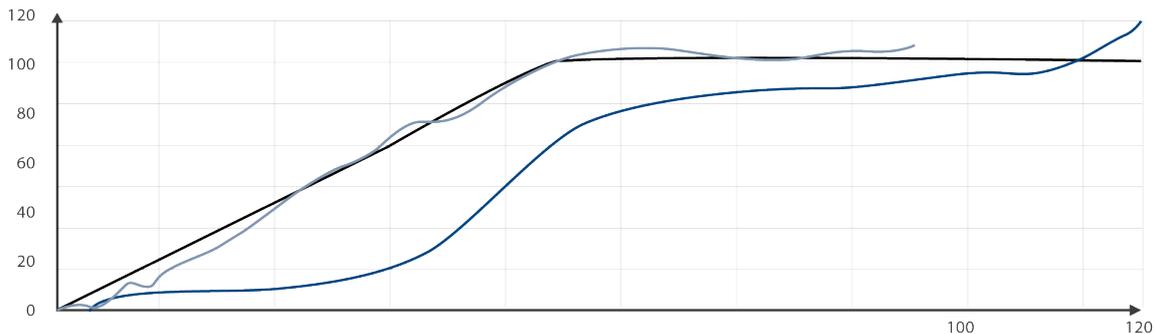


*Bild 3: Gegenüberstellung einer druckgeregelten (l.) und verzögerungsgeregelten (r.) Bremsung aus einer Geschwindigkeit von 120 km/h am ATLAS-Prüfstand*

— Bremszylinderdruck, — Verzögerung

Bei Bremsung mit geregelter Verzögerung werden die charakteristische Krümmung in der Verzögerungskurve und der Halteruck nivelliert, und der Anhalteweg wird unabhängig von begrenzten Abweichungen der Belagreibwerte.

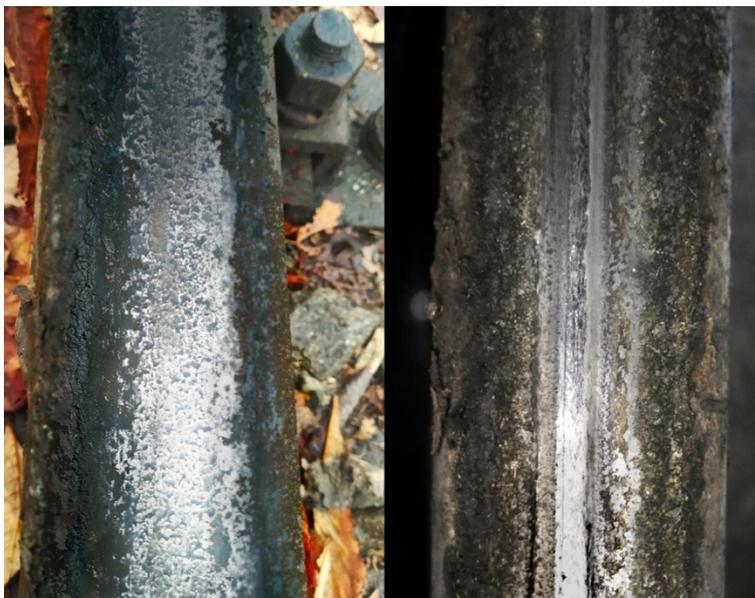
Für ein Extrembeispiel (Bild 4) aus einem Grundlagenversuch wurde ein Aquaplaning auf den Bremssscheiben provoziert, wie es kurzzeitig bei starkem Regen und Aufwirbelungen unter dem Zug auftreten könnte. Die Verzögerungsregelung detektiert das Aquaplaning ohne Zeitverzug. Durch einen Impuls des Bremszylinderdrucks wird es in Sekundenbruchteilen „weggebremst“. Bei unregelmäßiger Bremsung können dagegen mehrere Sekunden verlorengehen, ehe das Wasser von den Bremsbelägen verdrängt ist.



*Bild 4: Verzögerung (in Prozent vom Sollwert) über dem Anhalteweg (in Prozent vom Sollwert des Anhaltewegs). (Sollwert: schwarz; Ist-Wert bei geregelter Verzögerung: grau; Ist-Wert der Verzögerung bei konstantem Bremszylinderdruck: blau)*

### **Extrem schlechter Kraftschluss – das Problem Herbstlaub**

„Normal“ schlechte Adhäsionsbedingungen werden durch die Gleitschutzanlage beherrscht. Dabei gibt es innovative Lösungen, die die Verbesserung des Kraftschlusses durch Fahren in einem optimalen Schlupfbereich beinhalten. Die Praxis kennt jedoch Fälle extrem schlechter Schienenzustände, zum Beispiel durch eine Schicht festgefahrener Laub (Bild 5) in Verbindung mit einer bestimmten Feuchtigkeit.



*Bild 5: Die festgefahrene Laubschicht – in natürlicher Umgebung (links) und reproduziert am Rad-Schiene-Prüfstand (rechts).*

Mit Hilfe eines speziellen Verfahrens und einer Apparatur gelang es am Rad-Schiene-Prüfstand diesen Zustand reproduzierbar zu machen. Insbesondere bei Nebel oder leichtem Sprühregen widersteht diese Schicht mehreren Überfahrten, wobei der Rad-Schiene-Kraftschluss – bei nicht ausreichender Sandung – nur 20 Prozent des notwendigen Werts erreicht.

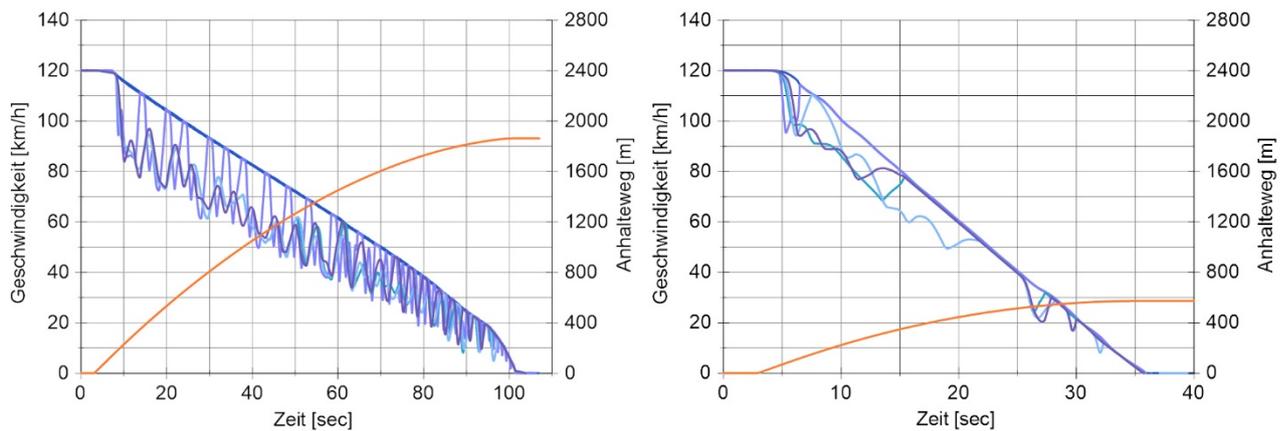
Zwar verhindert das Gleitschutzsystem auch unter diesen Bedingungen das Blockieren der Räder, die Einhaltung bestimmter Anhaltewege ist jedoch durch die reine Physik erschwert. Innovative Gleitschutzsysteme können dabei erkennen, in welchem Bereich des Radschlupfes noch die beste Kraftübertragung erfolgt und so das Maximum des Erreichbaren sichern [2].

### **Motivation und Ergebnis des Adhesion-Managements**

Die bewährte Urform des Adhesion-Managements ist das Sanden durch den Lokführer. Dafür stehen mit Druckluft oder elektromechanisch gut dosierbare Ausrüstungen zur Verfügung. Ein erfahrener und vorausschauender Lokführer kann so bei einer ausreichenden Anzahl vorhandener und betriebsbereiter Sandungsanlagen im Zug gute Ergebnisse erzielen.

Nicht nur für die automatische Fahr- und Bremssteuerung ist es jedoch wünschenswert, die Sandung durch eine bedarfsgerechte und ohne Zeitverzögerung arbeitende Automatik zu steuern, wodurch die Reproduzierbarkeit der Anhaltewege wesentlich gesteigert werden kann: So verliert ein mit 50 m/s (180 km/h) fahrender Zug durch einen Zeitverzug von drei Sekunden beim manuellen Auslösen fast 150 Meter Anhalteweg. Zudem ist die für den notwendigen Kraftschluss erforderliche Sandmenge bei einer Geschwindigkeit von 50 m/s mindestens fünfmal so groß wie bei 10 m/s. Zu wenig verwendeter Sand kostet Anhalteweg. Zu große Mengen führen zur Bildung isolierender Schichten auf der Schiene, aus denen Störungen der Gleisfreimeldungen resultieren können, sowie unnötiger Verunreinigung des Gleisbetts.

Die Aufzeichnung des Rad-Schiene-Prüfstandes zeigt, wie Automatik diese komplexen Anforderungen erfüllt (Bild 6): Sie bewertet den Kraftschluss aller Radsätze in Echtzeit und löst bei Bedarf in Sekundenbruchteilen eine dem Kraftschlussdefizit sowie der Geschwindigkeit entsprechende Sandung aus.



*Bild 6: Links der Verlauf einer Bremsung eines konventionell ausgerüsteten Fahrzeuges bei extrem schlechten Kraftschluss ohne ausreichende Sandung – ganz anders der Verlauf (rechts) beim Machbarkeitsnachweis eines innovativen Algorithmus mit automatischer Sandungsregelung.*

— Weg, — Geschwindigkeiten (Fahrzeug, Radsatz 1 bis 4)

Bei nicht zugeschalteter Automatik (links in Bild 6) werden alle Radsätze vom Gleitschutzsystem im gewünschten Bereich des Makroschlupfs gehalten. Dazu muss allerdings der Bremszylinderdruck signifikant abgesenkt werden. Folglich ist der geforderte Anhalteweg nicht mehr einzuhalten. Anstelle der in diesem Beispiel projektierten 529 Meter liegt er nun bei fast zwei Kilometern.

Bei zugeschalteter Automatik (rechts in Bild 6) – der erste von vier Radsätzen wird gesandet – rollen die ersten beiden Radsätze bereits nach wenigen Sekunden ohne Makroschlupf, die nachfolgenden Radsätze stabilisieren sich in einem für sie optimalen Bereich.

### **Weitere Anwendungsgebiete des Rad-Schiene-Prüfstands**

Die Optimierung des Rad-Schiene-Kraftschlusses und des Gleitschutzsystems sind naturgemäß die Hauptanwendungsgebiete des Rad-Schiene-Prüfstands. Darüber hinaus gestattet er jedoch eine Vielzahl weiterer Testarten, die für die technologische Weiterentwicklung des Schienenverkehrs gleichfalls große Bedeutung haben. Hierzu gehören beispielsweise der durch die Schienenfahrzeuge verursachte Verkehrslärm, die Interaktion von Bremsklötzen und Rädern, die thermische und mechanische Wechselbeanspruchung des Kontaktpunkts beim Bremsen, das Verhalten von Bremskrafterzeugern bei der Bewegung des Radsatzes im Fahrbetrieb oder die Wirkung von Schienenbremsen und Putzklötzen.

Literaturverzeichnis:

[1] Englbrecht, Linke, Hohmann, Gremmel. Höhere Transportkapazitäten auf der Schiene: Simulation zeigt Potenziale für optimierte Auslastung bestehender Infrastruktur. ZEV Rail, 08/2020

[2] Meyer, Rasel. Höhere Zugtaktung: Neuartiger Gleitschutz für eine verbesserte Auslastung der Schieneninfrastruktur. ZEV Rail, 11-12/2020

Vitae:

**Christian Burger** Seit 2010 Versuchs- und Entwicklungsingenieur bei Knorr-Bremse Systeme für Schienenfahrzeuge GmbH München in den Bereichen Bremssteuerung und Rad-Schiene-Prüfstand ATLAS. Anschrift: Knorr-Bremse Systeme für Schienenfahrzeuge GmbH, D-80809 München, Moosacher Str. 80, E-Mail: [Christian.Burger@knorr-bremse.com](mailto:Christian.Burger@knorr-bremse.com)



**Andreas Festel** Studium der Fahrzeugtechnik in Zwickau, seit 2012 Versuchsingenieur bei Knorr-Bremse Systeme für Schienenfahrzeuge GmbH München im Bereich Rad-Schiene-Prüfstand ATLAS. Anschrift: Knorr-Bremse Systeme für Schienenfahrzeuge GmbH, D-80809 München, Moosacher Str. 80, E-Mail: [Andreas.Festel@knorr-bremse.com](mailto:Andreas.Festel@knorr-bremse.com)



**Martin Heller** Studium Maschinenbau / Schienenfahrzeugtechnik in Dresden. Seit 1986 in verschiedenen Positionen in Entwicklung und Versuche bei Knorr-Bremse Systeme für Schienenfahrzeuge in Berlin und München. Anschrift: Knorr-Bremse Systeme für Schienenfahrzeuge GmbH, D-80809 München, Moosacher Str. 80, E-Mail: [Martin.Heller@knorr-bremse.com](mailto:Martin.Heller@knorr-bremse.com)



**Jörg Koch** Studium Maschinenbau in München. Seit 1998 bei Knorr-Bremse Systeme für Schienenfahrzeuge in verschiedenen Funktionen im Prüfstandsbau und Versuch. Von 2006 bis 2010 bei New York Air Brake in Watertown (USA) im Prüfstandsbau. Seit 2012 als Teamleiter verantwortlich für Entwicklung, Aufbau und Betrieb des Rollenprüfstands ATLAS. Anschrift: Knorr-Bremse Systeme für Schienenfahrzeuge GmbH, D-80809 München, Moosacher Str. 80, E-Mail: [joerg.koch@knorr-bremse.com](mailto:joerg.koch@knorr-bremse.com)

